

多层衬底、高 T_c 超导薄膜热敏红外探测器的热导研究

王德宁 陈 红 王渭源

中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050

1991 年 10 月 15 日收到

本文提出在高 T_c 超导薄膜平面热敏红外探测器中光辐照引起超导膜上呈高斯分布温升的模型。在此模型基础上, 导出了计算衬底热导的基本方程。它不仅能适用于单层平面型衬底的热导计算, 而且适用于串联结构多层平面型衬底的热导计算。计算结果与文献[7]的结果相一致, 也与文献[1]的实测值符合, 具有较大的普适性。

应用 Math CAD 程序, 得出了衬底热导 G_s 与光照半径 r 、衬底厚度 d 和频率 f 三者间的相互关系, 从而为选择最佳结构或工艺参数创造了条件, 指明了提高探测器响应率、比探测率等和降低等效噪声功率的途径。

PACC: 7430E; 6670; 0762; 7475

一、引 言

随着超导材料临界温度 T_c 的不断提高, 制备工艺日趋完善, 高 T_c 超导材料的应用也日益受到人们的重视, 特别是高 T_c 超导薄膜器件的实际应用更是受到广大科技工作者的关心。其中尤以红外探测器的实际应用的前途最为明朗。这是因为超导探测器有两大特点: (1) 噪声甚小, 其电平甚至小到接近量子效应极限——海森堡测不准原理的噪声电平, 它可以检测绝大多数探测器不能检测的微弱信号; (2) 可测波长范围宽阔, 波长可达几十微米, 这种应用范围十分诱人。

按其原理, 可制作两种不同类型探测器: (1) 光电型 (“current” mode) 约瑟夫森结探测器; (2) 热敏型 (bolometer mode) 探测器。前者由于中间的超薄 I 层 (绝缘层) 制作难度较大, 给结型器件制作带来了较大困难。后者由于结构、制作相对简单一些, 因此我们首先集中研究热敏型红外探测器。Stratton 等人已研制出平面型、多层结构高温超导薄膜热敏探测器^[1]。他们采用 DyBaCuO 超导薄膜, 其响应率 $\mathscr{R}$ 已达 800V/W, 响应时间为 1ms, 工作温度达 89K。但其热导还太大, 过渡区太宽, 器件可挖潜力还是很大的。因此, 如何从理论上予以正确分析, 分析结构和工艺参数对器件性能就显得十分重要。Hu 等人^[2]曾对高 T_c 超导薄膜红外探测器进行了理论分析, 但他们仅对天线式结构作了半球形模型近似分析, 这对平面型多层结构不太适用。为此, 本文发展了一种新型的平面多层结构模型, 可很好地导出计算此类结构的关键参数——热导 G 的一系列数学表达式。应用这些表达式可方便地分析一些重要参数: 光照半径 r , 各薄层厚度 d_i 、频率 f 对热导

G 的影响,并从中获得降低 G 而提高响应率 $\mathcal{R}$ 的最佳工艺参数. 讨论了提高高 T_c 超导薄膜热敏红外探测器性能的途径. 计算结果与实验值^[3]作了比较,两者较好地相符合.

二、理论推导

高 T_c 超导薄膜热敏红外探测器的性能主要取决于下面三大指标:

1. 响应率^[4]

$$\mathcal{R} = \eta [2R \cdot [G(1 + \omega^2\tau^2)^{1/2}]^{-1}, \quad (1)$$

式中 η 为实际吸收系数, I 为偏置电流, R 为探测器的电阻, α 为电阻温度系数, 即为 $\frac{d \ln R}{dT}$, τ 为响应时间, 即为 C/G , C 为衬底材料的热容, G 为热导, ω 为角频率.

2. 等效噪声功率^[5]

$$NEP = V_N / \mathcal{R}, \quad (2)$$

式中 V_N 为噪声电压.

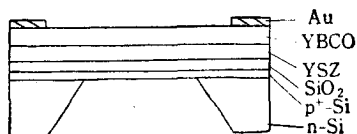
3. 比探测率^[5]

$$D^* = \frac{\mathcal{R}}{V_N} \sqrt{A \Delta f}, \quad (3)$$

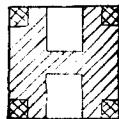
式中 A 为探测器面积, Δf 为放大器的带宽.

从(2)和(3)式可见,要降低 NEP , 增大 D^* , 均需提高 $\mathcal{R}$; 而由(1)式可知,要提高 $\mathcal{R}$, 必须降低热导 G 和增大电阻温度系数 α . 当然提高电流密度 J (即 I) 和 η 或降低热容 C 也可提高 $\mathcal{R}$. 但一般情况下, 热导 G 与材料性质、器件结构均有关, 选择得好, G 可降低几个数量级, 可挖潜力较大. 因此我们特别着重研究器件热导 G 对 $\mathcal{R}$ 的影响.

本文研究结构为多层、薄膜型, 如图 1 所示. 在硅衬底上生长 SiO_2 层, 再在上生长掺 Y 的 ZrO_2 缓冲层 (简记为 YSZ 层). 在 YSZ 层上生长 YBaCuO 超导层, 超导薄膜层用激光修调成“H”形以提高电流密度, 再在四个角上蒸上金电极. 因此总的探测器的热导 G 为



(a) 剖面结构图



(b) 俯视图

图 1 多层平面结构热敏红外探测器结构示意图

$$G = G_s + G_A + G_M. \quad (4)$$

由三部分组成, 即超导体至衬底间热导 G_s , 超导体至空气间热导 G_A 以及超导体至金属电极间热导 G_M 之和. 由于空气为热的不良导体, 故 G_A 远小于其它两项, 可忽略. 根据文献[2]的推导, $G_M = 0.6G_s$. 因而 $G = 1.3G_s$, G 的计算可归结为计算 G_s . 由于本文

讨论的是多层结构的衬底,为串联结构形式(如图 1 所示),按一般物理学定义,其衬底总热导

$$\frac{1}{G_{sr}} = \frac{1}{G_{s1}} + \frac{1}{G_{s2}} + \frac{1}{G_{s3}}, \quad (5)$$

式中 G_{s1} 为 YSZ 衬底的热导, G_{s2} 为 SiO_2 衬底的热导, G_{s3} 为 Si 衬底的热导。各层衬底的热导可由下列方法求出: 根据文献[3],热导的一般表达式为

$$G_s(f) = k_s |\nabla T \cdot dS / \Delta T|, \quad (6)$$

式中 k_s 为衬底的热导率, T 为衬底的温度, dS 为表面积的微分, ΔT 为光辐射到探测元上引起的温升, ∇T 为衬底的温度梯度, f 为频率。

从(6)式可知,要解此方程,需知道光照在超导表面上引起的温度分布。我们假定光照引起的温度分布有如光照热堆的高斯分布^[4],如图 2 所示,则温度分布可写成下面形式:

$$T(r, t) = T_m(0, t) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{r}{a(t)r + b(t)} \right]^2 \right\}, \quad (7)$$

式中 r 为膜的径向; t 为光照时间, $t = \frac{1}{2\pi f}$ 。用数值模拟法,可精确地求得方程(7)中各系数,即

$$a(t) = -0.9547 + 5.48 \times 10^{-3}t, \quad (8a)$$

$$b(t) = 0.964 - 3.2 \times 10^{-4}t, \quad (8b)$$

$$t = 0.07561T_m^2(0, t) - 0.04575T_m(0, t) + 0.01588. \quad (8c)$$

令(6)式中积分部分为 $u = \left| \int \nabla T \cdot dS \right|$, 则在直角坐标系下

$$u = \left| \iiint \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dx dy dz \right|,$$

化为圆柱坐标系下,则

$$u = \left| \int_0^{r_0} r dr \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^d dz \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \right| \quad (9)$$

式中 d 为衬底厚度, r_0 为入射光束半径,也可视为超导材料受光表面积 ($A = \pi r_0^2$) 的半径。

由(7)和(8)式可知 u 与 θ, z 无关,则(9)式可化简为

$$u = 2\pi d \left| \int_0^{r_0} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \right| = 2\pi d \left| r \left(\frac{dT}{dr} \right) \right|_0^{r_0}. \quad (10)$$

而

$$\frac{dT}{dr} = -T_m(0, t) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{r}{a(t)r + b(t)} \right]^2 \right\} \cdot \left[\frac{r}{a(t)r + b(t)} \right] \cdot \frac{b(t)}{[a(t)r + b(t)]^2}$$

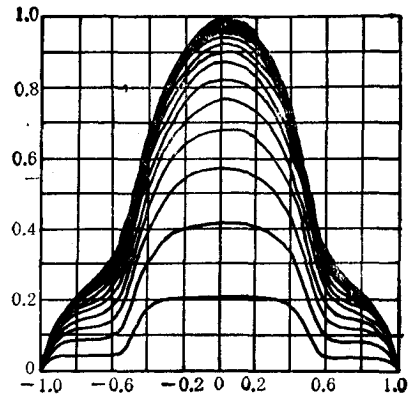


图 2 光照后超导膜的径向温度分布
每 5 个 ms 为一个步长

$$-T_m(0, t) \frac{rb(t)}{[a(t)r + b(t)]^3} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{r}{a(t)r + b(t)}\right]^2\right\}. \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式,得

$$u = 2\pi d T_m(0, t) \frac{b(t)r_0^2}{[a(t)r_0 + b(t)]^3} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{r_0}{a(t)r_0 + b(t)}\right]^2\right\}, \quad (12)$$

(6)式中光照后的温度分布为

$$\Delta T = \left| \frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} (T - T_0) dr \right| = \left| \frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} T dr - T_0 \right|, \quad (13)$$

(7)式代入上式,可得

$$\Delta T = \left| \frac{1}{r_0} T_m(0, t) \int_0^{r_0} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{r}{a(t)r + b(t)}\right]^2\right\} dr - T_0 \right|, \quad (14)$$

式中 $T_0 = T_m(0, t) \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{r_0}{a(t)r_0 + b(t)}\right]^2\right\}$. 将(12)和(14)式代入(6)式,且设

$$\Phi = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{r_0}{a(t)r_0 + b(t)}\right]^2\right\},$$

$$\Phi_0 = \frac{b(t)r_0^2}{[a(t)r_0 + b(t)]^3},$$

$$\Phi_1 = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{r}{a(t)r + b(t)}\right]^2\right\},$$

则

$$G_s(f) = 2\pi d \cdot k_s \left| \frac{\Phi_0 \Phi}{\frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} \Phi_1 dr - \Phi} \right|. \quad (15)$$

令

$$y(a(t), b(t), r) = \left| \frac{\Phi \Phi_0}{\frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} \Phi_1 dr - \Phi} \right|, \quad (16)$$

则

$$G_s(f, k_s, d, r) = 2\pi k_s d \cdot y(a(t), b(t), r). \quad (17)$$

应用上述公式,可方便地计算各种衬底材料和各工艺参数条件下的衬底与热导间的热导。

三、结果与讨论

应用 MCAD 程序可对上述结果进行数值计算。计算的步骤为

(1) 选取一定的 f (即 $\frac{1}{2\pi t}$), 可由 (8a)~(8c) 式计算出 $a(t)$, $b(t)$ 和 $T_m(0, t)$;

(2) 选取一定的 r_0 , 可由(16)式得到 $y(a(t), b(t), r)$;

(3) 由不同衬底材料的 k_s 和不同厚度 d 值, 可得不同衬底材料或不同厚度的 G_s 。

首先应用 (17) 式计算了单层结构衬底的热导, 计算条件完全按照文献[7]的条件:

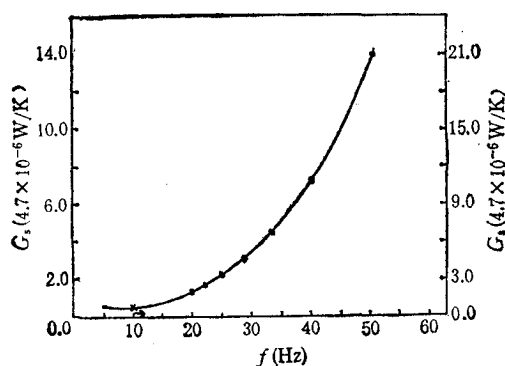
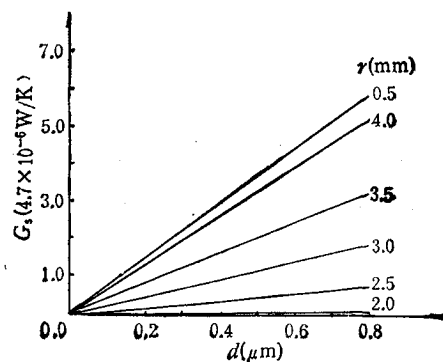
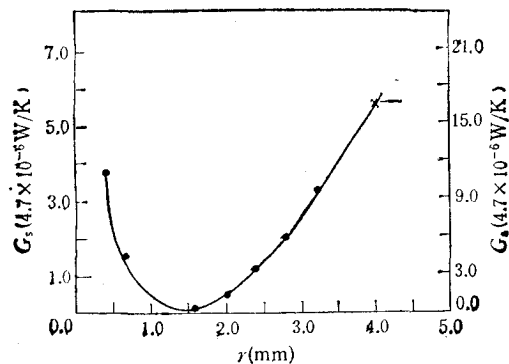
$r = 0.9 \mu\text{m}$ (即 $A = 5 \mu\text{m}^2$), $d = 0.9 \mu\text{m}$, 和 $f = 10 \text{Hz}$ 。计算结果与文献[7]中应用半

表 1 几种单层结构衬底的 G , 计算值比较

衬底材料		蓝宝石 (Al_2O_3)	MgO	YSZ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$)	石英	单晶 SiO_2
$k_s(\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K})$ [8]		6.4	3.4	0.015	0.062	0.35
$G_s(\text{W}/\text{K})$	文献[7]	3.6×10^{-3}	1.9×10^{-3}	8.4×10^{-6}	3.5×10^{-6}	2.0×10^{-4}
	本文	2.9×10^{-3}	1.6×10^{-3}	6.9×10^{-6}	2.8×10^{-6}	1.6×10^{-4}

球体模型的计算结果作了比较,结果示于表 1。两者的计算结果基本一致,说明本文的计算方法也能适用于文献[7]所述的天线式半球体模型。但后者却不适用于计算平面型(即超导薄膜面积较大, A 有 1mm^2 左右)。这表明本文模型更具普适性。此外,我们还应用本文的计算方法于文献[1]所示的多层结构,其 G 应用本文计算的数据,其余参数均用文献[1]的数据。计算得到的探测率值与文献的实测值基本符合。这证实了本计算方法可适用于图 1 所示的结构器件。

我们还采用 MCAD 程序,计算得到 G_s - f , G_s - d , G_s - r 间关系,分别示于图 3, 图 4 和图 5。由图 3 可见, G 与 f 关系较为复杂。在 $f = 5\text{--}20\text{Hz}$ 范围内均可采用。 f 太小,光

图 3 G_s - f 关系 $r = 3.0\text{mm}$; $d = 0.5\mu\text{m}$ 图 4 G_s - d 关系 $f = 20\text{Hz}$ 图 5 G_s - r 关系 $f = 20\text{Hz}$; $d = 0.5\mu\text{m}$

照引起的温升高斯分布很陡(见图 2), 分布不均匀, 会引起响应率波动, 不利于探测器的稳定应用; f 太大, G 急剧上升, 也是不利的, 一般文献上采用 $f = 20\text{Hz}$ 是有一定合理性的。由图 4 可见, 从理论上讲衬底越薄越有利于降低 $\mathcal{R}$, 但在实际过程中, 我们发现缓冲层厚度还受超导薄膜厚度的制约。因为采用 dc 磁控溅射法制备超导薄膜, T_c 的提高要有适当厚度。根据实验结果, 超导膜厚一般需 $5000\text{\AA}$, 故作为缓冲层 YSZ 的厚度也取 $5000\text{\AA}$ 左右为宜。至于 Si 衬底, 由于其 k_c 值较大, 应尽量减薄, 我们应用先进的微机械加工技术, 将 Si 衬底腐蚀呈倒杯状(如图 1 所示), 即超导薄膜底部的 Si 尽量全部除去, 使其 $d \rightarrow 0$ 。由图 5 可见, G 与 r 关系上有一个最低点, 即在光照半径 $r = 1\text{mm}$ 左右, G 最小, 这就要求我们采用光锥或光纤技术得到一个小的光斑。

由于探测器的响应时间 $\tau = C/G$, 因此衬底的热容越小, 越有利于 $\mathcal{R}$ 的提高。虽然 SrTiO_3 的热容在常见衬底中最小并且和 YBCO 薄膜的晶格匹配较好, 但我们研制的是 Si 衬底上生长缓冲层再生长超导薄膜结构, 因为 Si 衬底是目前发展最快的电子材料, 大部分集成电路的技术可用于 Si, 因此这种探测器的外加电路容易制作和集成, 很有发展前途。但 Si 上要生长 SrTiO_3 缓冲层是十分困难的。选择 YSZ 作缓冲层, 它的热容量虽比 SrTiO_3 稍大, 但在 Si 上易生长, 且具稳定性, 这样制得的器件容易实用化。

当然, 除了降低 G 以求提高 $\mathcal{R}$ 外, 从(1)式还可见, 电阻温度系数 α 的提高对 $\mathcal{R}$ 的提高也是十分必要的, 我们将在另文中予以详细讨论, 这里不赘述。

- [1] T. G. Stratton *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990), 99.
- [2] Qing Hu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989), 2444.
- [3] P. L. Richards *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989), 283.
- [4] R. J. Keyes 主编, 董培芝等译, 光探测器与红外探测器, 北京 科学出版社, (1984).
- [5] 纪红, 红外技术基础与应用, 科学出版社, (1979), 第 76—78 页.
- [6] 许书务编译, 光感测器界面专题, 台北 电子技术出版社(1988), 第 198 页.
- [7] T. L. Hwang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **34** (1979), 773.
- [8] Y. S. Touloukran, *Thermophysical Properties of Inorganic Solids* vol. 2 (Plenum, New York, 1978).

INVESTIGATION OF THERMAL CONDUCTANCE ON BOLOMETRIC INFRARED DETECTOR OF HIGH T_c SUPERCONDUCTING FILM GROWN ON MULTILAYER SUBSTRATE

WANG DE-NING CHEN HONG WANG WEI-YUAN

Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200050

(Received 15 October 1991)

ABSTRACT

In this paper, we set up the model of Gaussian distribution on the temperature of illuminated superconducting film and derive a serial formula, from which the equation of the substrate thermal conductance $G_s = 2\pi k_s \cdot d \cdot \gamma(a(t), b(t), r)$ can be obtained. It can be used not only for G of single-layer substrate, but also for G of multi-layer substrate. The calculated results are in good agreement with the experimental ones.

Using Maths CAD programm, the relations between illumination radius r , substrate thickness d or frequency f and G_s could be obtained. Based on the above, the optimized structure or art parameters of the detector can be selected and some effective methods for improving its properties will be considered.

PACC: 7430E; 6670; 0762; 7475